

Bioenergiakeskuksen julkaisusarja  
(BDC Publications)  
Nro 2

# **PILKKEEN KEINOKUIVAUKSEN VAIHTOEHDOT KAUPALLISESSA PILKETUOTANNOSSA**

Markku Vääräsmäki  
2003





# **PILKKEEN KEINOKUIVAUKSEN VAIHTOEHDOT KAUPALLISESSA PILKETUOTANNOSSA**

**Markku Vääräsmäki**

**Asiantuntijuushanke**

**Toukokuu 2003**



**JYVÄSKYLÄN  
AMMATTIKORKEAKOULU**

*Luonnonvarainstituutti*

# SISÄLLYS

<b>1 HANKKEEN TAUSTA .....</b>	<b>4</b>
<b>2 HANKKEEN TAVOITE .....</b>	<b>5</b>
<b>3. KUIVAUKSEN PERUSTEET .....</b>	<b>6</b>
<b>3.1 Kosteus puussa.....</b>	<b>6</b>
<b>3.2 Ilman kyky kuivata.....</b>	<b>8</b>
<b>4 POLTTOPUUN KUIVAUS.....</b>	<b>12</b>
<b>4.1 Perinteiset polttopuun kuivausmenetelmät.....</b>	<b>12</b>
4.1.1 Harva- tai avoseinäinen katos.....	12
4.1.2 Betoniverkkohäkki .....	13
4.1.3 Verkkosäkki ja pilkehäkki.....	13
<b>4.2 Polttopuiden keinokuivaus .....</b>	<b>13</b>
4.2.1 Yleistä pilkekuivureista.....	13
4.2.2 Pilkekuivurin mitoittaminen.....	14
4.2.3 Vastapaine pilkekuivurissa.....	14
4.2.4 Pilkekuivurin käyttö .....	15
4.2.5 Lisälämmön käyttö kuivauksessa.....	17
<b>5. PILKEKUIVURITYYPIT.....</b>	<b>18</b>
<b>5.1 Siirrettävä kuivuri.....</b>	<b>18</b>
<b>5.2 Kevytrakenteinen kenttäkuivuri.....</b>	<b>20</b>
<b>5.3 Ajonkestävä monikäyttökuivuri.....</b>	<b>22</b>
<b>5.4 Lämminilma konttikuivuri.....</b>	<b>23</b>

<b>6. TULOKSET .....</b>	<b>25</b>
<b>6.1 Kuivausajat .....</b>	<b>25</b>
6.1.1 Siirrettävä kuivuri.....	25
6.1.2 Kiinteä monikäyttökuivuri .....	27
6.1.3 Kevytrakenteinen kenttäkuivuri .....	28
6.1.4 Lämminilma konttikuivuri .....	28
<b>6.2 Kuivauksen kustannukset.....</b>	<b>29</b>
<b>7. TULOSTEN TARKASTELU.....</b>	<b>33</b>
<b>LÄHTEET.....</b>	<b>35</b>
<b>LIITTEET.....</b>	<b>36</b>

# 1 HANKKEEN TAUSTA

Suomen maataloilla, pientaloissa ja kesämökeillä käytetään polttopuuta 10-15 milj. i-  
m<sup>3</sup> vuodessa. Pääosa tästä määrästä on pilkettä. Merkittävä osa käytettävästä pilkkees-  
tä hankitaan kaupallisilta pilketuottajilta. Kuiva polttopuu on ostajia ajatellen hyvin  
tärkeä asia. Luonnonkuivaus on ollut perinteinen kuivaustapa. Siinä pilkkeet saavat  
kuivua ulkona katetuissa pinoissa ja kasoissa 1-2 vuotta. Kiinnostus keinokuivaukseen  
on lisääntynyt, koska luonnonkuivaus ratkaisut ovat liian tehottomia. Pilkekuivuri on  
verrattain harvinainen menetelmä koko Suomessa ja pilkkeitä tuottavien yrittäjien  
kuivuriratkaisut ovat yleensä itse kehiteltyjä. Perinteisten puunkuivausmenetelmien  
ongelma on siinä, että pilkkeiden kiertonopeus on hidas ja korko- ja varastointikustan-  
nukset sen takia korkeat. Myös laatuvaihtelut puussa ovat todennäköisiä. Lisäksi tuo-  
tanto on joustamatonta kysynnän vaihteluihin. Pilkekuivurin avulla pilkkeen tuotantoa  
voidaan tehostaa, kun kuivausaika lyhenee ja pilke saadaan tasalaatuisemmaksi. Myös  
varastokapasiteetin tarve vähenee. Pilkkeen keinokuivauksessa yleisin tapa on lämmit-  
tämättömän ulkoilman puhallus katetuissa tiloissa. Tätä sanotaan kylmäilmakuivauk-  
seksi. Keinokuivauksen pitää kuitenkin hinnaltaan olla edullista, koska edullisia, pe-  
rinteisin menetelmin kuivattuja polttopuita on markkinoilla runsaasti. Hyötyä keino-  
kuivauksesta saadaankin vasta suuremmilla vuotuisilla tuotantomäärillä, jolloin yksik-  
kökustannukset luonnollisesti laskevat.

## 2 HANKKEEN TAVOITE

Hankkeen tavoitteena on selvittää:

Minkä tyyppinen pilkekuivuri olisi eri tuotantomäärillä kustannuksiltaan paras ratkaisu kaupallisessa pilketuotannossa.

Kylmäilmakuivauksessa vaihtoehtoina ovat kiinteä kuivuri, pieni siirrettävä kuivuri ja kevytrakenteinen kenttäkuivuri. Lämminilma kuivureista tarkastellaan Suomessa ainakin vielä tuntematonta konttikuivuria, koska pilkeyrittäjillä on erityistä kiinnostusta nopeaan kuivaukseen säästä riippumatta. Myös sahatavara kuivaamon käyttöä tarkastellaan pilkkeen kuivauksessa. Keinokuivauksen kustannuksia verrataan perinteisiin menetelmiin.

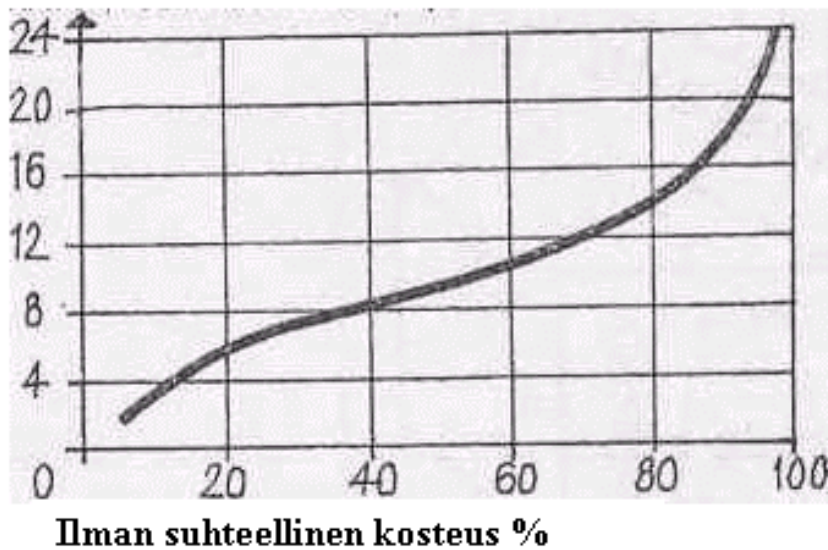
### 3. KUIVAUKSEN PERUSTEET

#### 3.1 Kosteus puussa

Tuoreessa puussa kosteuspitoisuus vaihtelee yleensä 40-60 % välillä. Polttopuut tulisi pyrkiä kuivaamaan 15-25 % kosteuteen, jolloin ne poltettaessa palavat hyvin ja tuottavat tehokkaasti lämpöenergiaa. Polttopuun ollessa liian kosteaa energiaa kuluu veden lämmittämiseen ja höyrystymiseen ja näin ollen puusta saatava tehollinen lämpöarvo laskee massayksikköä kohden. Kuiva polttopuu merkitsee myös parempaa hyötysuhdetta lämmityksessä. (Pilkeopas omakotitaloille 1997, 28.) Kuiva polttopuu on myös tuoretta kevyempää, jolloin se on luonnollisesti helpompaa käsitellä.

Puu on hygroskooppinen aine eli se pystyy sitomaan vesihöyryä itseensä ympäröivästä ilmasta. Ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila vaikuttavat puun kosteustasapainoon joko vesihöyryn imeytymisenä tai poistumisena (kuvio 1). Luonnon oloissa puu ei voi saavuttaa 0 % kosteuspitoisuutta. Kun puuta kuivataan, niin ensimmäisenä puusta haihtuu vesi, joka on sitoutunut puun soluonteloihin irtovetenä. Viimeisenä puusta poistuu nk. sidottu vesi, joka on soluseinämässä. Kun sidottu vesi alkaa poistua, saavutetaan puun kyllästymispiste, joka on keskimäärin 28 %:n kohdalla. Alhaisemmissa kosteuksissa soluseinämässä olevan veden poistamiseen tarvitaan enemmän energiaa kuin irtoveden poistamiseen. (Pikkujämsä 2001, 3.)

### Polttopuun kosteus



Kuvio 1. Polttopuun kosteus muuttuu sitä ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden kanssa (Järvenpää ja Kivinen 1993).

Kaadetun puun kuivuessa vettä haihtuu etupäässä vain katkaisupinnoilta, mutta jonkin verran vettä poistuu myös pintarikkoutumien kautta. Näin ollen polttopuut tulisikin yleensä halkaista ja ohuimmat aisata, jotta kuivuminen tehostuisi. Harvesterilla karsitut polttorangat kuivuvat hyvin halkaisemattakin, koska karsintaterät ovat kuorineet ja rikkoneet puun pintaa. Tämä koskee varsinkin koivua. Vesi myös liikkuu pituussuunnassa 20-kertaisesti verrattuna poikkisuuntaiseen liikkeeseen ja tämän vuoksi lyhyempi pilke kuivuu nopeammin kuin pidempi (Pikkujämsä 2001, 4).

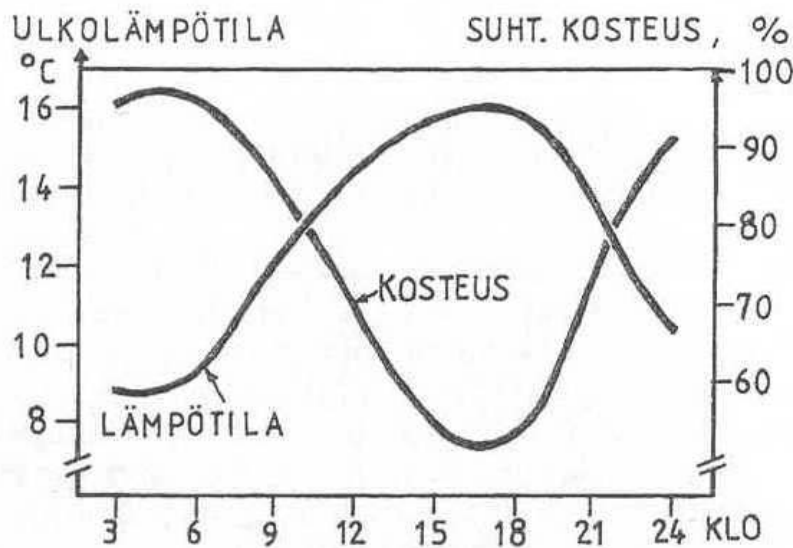
Puupolttoaineen kosteudesta puhuttaessa on oltava tarkkana siitä, kuinka kosteus on määritetty. Kosteudella tarkoitetaan polttoaineessa olevan veden suhdetta polttoaineen märkäpainoon. Sahatavaran kosteuden määrittämisessä käytetään kuitenkin kosteussuhdetta, joka määrittellään puussa olevan veden suhteeksi puupolttoaineen kuivapainoon. (Saranpää ja Tuimala 1997.) Seuraavan kaavan perusteella voidaan laskea kosteusprosentti.

$$\text{Kosteusprosentti} = \frac{\text{veden massa}}{\text{puun kuiva-aineen massa} + \text{veden massa}} * 100 \%$$



### 3.2 Ilman kyky kuivata

Ilmassa on energiaa, jota voidaan hyödyntää kuivauksessa. Osa ilman energiasta on sitoutunut sen lämpöön ja osa taas ilmassa olevaan vesihöyryyn. Eli mitä korkeampi on ilman lämpötila, sen enemmän se sisältää energiaa. Kun ilmaan sitoutuu lisää vesihöyryä, siirtyy ilman energia vesihöyryn energiaksi. Tällöin ilman suhteellinen kosteus nousee ja lämpötila laskee (kuvio 2). Veden tiivistyessä vesihöyrystä nesteeksi, ilman lämpötila nousee jälleen. Ilman yhteenlaskettu kokonaisenergiamäärä pysyy kuitenkin näissä ilmiöissä vakiona. (Järvenpää ja Kivinen 1993, 4.)



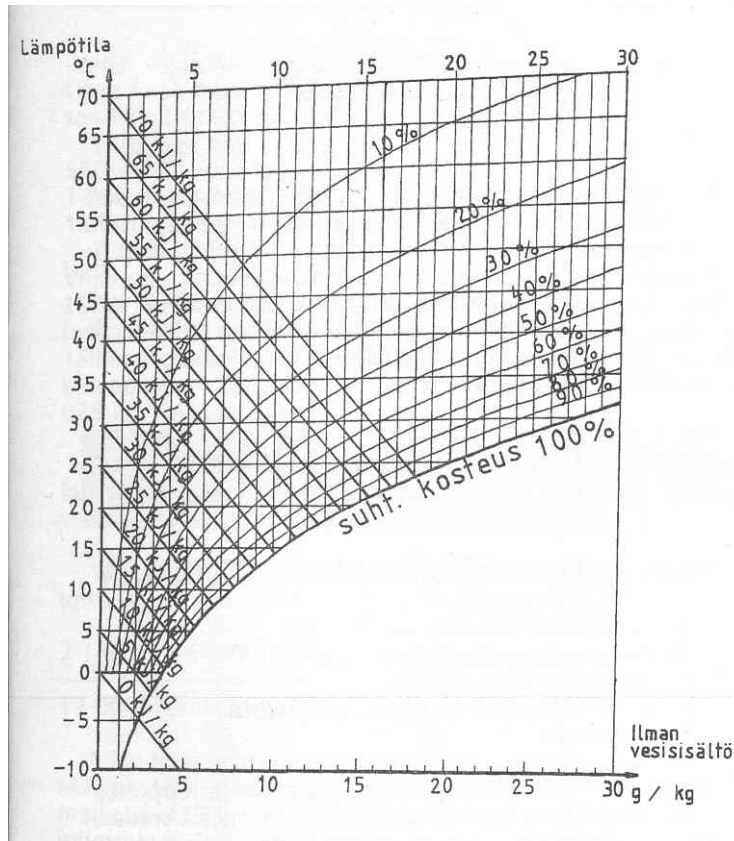
Kuvio 2. Esimerkki ulkolämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden vuorokausimuutoksista. Ilman lämmitessä sen suhteellinen kosteus laskee (Järvenpää ja Kivinen 1993).

Ulkoilmassa on aina vesihöyryä. Vesihöyryn absoluuttinen määrä ilmaistaan grammoina kuivaa ilmakiloa kohden (g/kg) tai vaihtoehtoisesti grammoina ilmakeuutiometriä kohden (g/m<sup>3</sup>). Kuutiometri ilmaa painaa 5-20 asteen lämpötilassa keskimäärin 1,2 kg. Syksyllä ilmassa olevan veden määrä vaihtelee välillä 3-6 g/kg ilmaa. Ilman vesisisältö on eri vuorokaudenaikoina jokseenkin vakio ja muuttuu vasta säätyypin selvästi muuttuessa. Suhteellinen kosteus vaihtelee kuitenkin merkittävästi lämpötilan mukaan. Suhteellinen kosteus ilmoittaa, kuinka paljon ilmassa on vettä verrattuna siihen suurimpaan määrään, jonka ilma kykenisi tietyssä lämpötilassa pidättämään höyryynä. (Järvenpää ja Kivinen 1993, 3-4.)

Mollier-piirroksen avulla voidaan laskea, kuinka paljon ilma pystyy sitomaan itseensä vettä erilaisissa lämpötiloissa ja suhteellisissa kosteuksissa. Ilman suhteellinen kosteus ilmaisee sen, kuinka paljon ilmassa on vettä verrattuna suurimpaan määrään, jonka se kykenee sitomaan höyrynä itseensä tietyssä lämpötilassa. Ilman suhteellinen kosteus voidaan laskea seuraavan kaavan avulla.

$$\text{Suhteellinen kosteus (\%)} = \frac{\text{ilmanvesisisältö (g/kg)}}{\text{ilman maksimivesisisältö (g/kg)}}$$

Kun suhteellinen kosteus on 100 %, niin ilman vedenpidätyskyky on käytetty täysin. Kuvion 3 Mollier-piirrokseen on lisätty suhteellisen kosteuden käyrät. Esimerkiksi 50 %:n käyrällä ilman vesisisältö on puolet maksimivesisisällöstä. Kun ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila tiedetään, niin kuviosta voidaan lukea ilman absoluuttinen vesisisältö (g/kg). Seuraavaksi tarkastellaan vakioenergiasuoria. Suorien avulla voidaan tarkastella ilmakilon kykyä sitoa kosteutta eri kosteuspitoisuuksilla ja lämpötiloilla. Vakioenergiasuorat perustuvat siihen, että ilmasta ei poistunut energiaa vaan se sitoutuu ilmasta vesihöyryyn tai päinvastoin. Tietyn suoran jokaisessa pisteessä ilman kokonaisenergia on sama, mutta sen jakautuminen lämpöenergiaan ja vesihöyryyn sitoutuneeseen energiaan vaihtelee. Kuivauksen aikana ilmaan sitoutuu vesihöyryä, mikä laskee ilmanlämpötilaa, mutta nostaa ilman suhteellista kosteuspitoisuutta vakioenergiasuorien mukaisesti. Ilman lämpötila ja kosteus muuttuvat kuivauksessa vakioenergiasuorien mukaisesti.

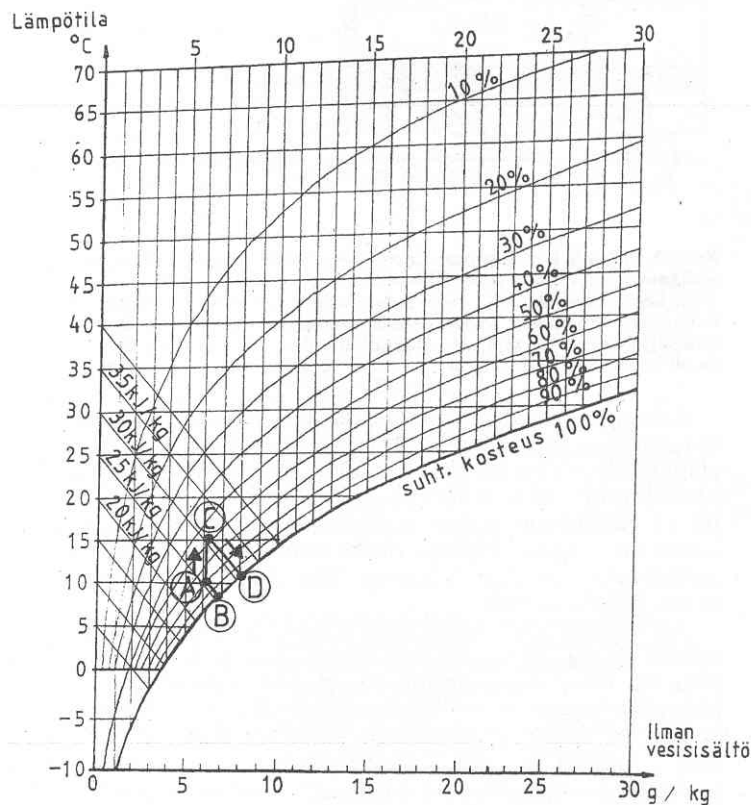


Kuvio 3. Mollier-piirros, joka sisältää suhteellisen kosteuden käyrät ja vakioenergia-suorat (Järvenpää ja Kivinen 1993).

Seuraavan esimerkin avulla voidaan havainnollistaa Mollier-piirroksen käyttöä (kuvio 4). Ulkoilman lämpötila on 10 astetta ja ilman suhteellinen kosteus 80 prosenttia. Näin ollen ilmassa on vettä 6g/kg, joka on piirroksessa merkittynä A-pisteinä. Johtamalla vakioenergiasuoraa oikealle alas huomataan, että 100 % suhteellisessa kosteudessa lämpötila on 8 astetta ja ilmassa on tällöin vettä 6,7 g/kg, piste B. Nyt voidaan laskea, että kuivauksessa on mahdollista poistaa  $6,7\text{g/kg} - 6\text{g/kg} = 0,7\text{g}$  vettä ilmakiloa kohti, joka on varsin vähän. Kun esimerkiksi lämpötilan ollessa 15 astetta ja suhteellisen kosteuden ollessa 50 %, voidaan poistaa 2,1 g vettä ilmakiloa kohden.

Lisälämmön avulla kuivausta voidaan tehostaa huomattavasti. Kun ilmaa lämmitetään esimerkiksi auringonpaisteen tai jonkun lisälämpölähteen avulla, niin lämmitys ei vai- kuta ilman absoluuttiseen vesisisältöön. Lämpötila ja energiasisältö kuitenkin muuttu- vat. Kun ilma lämpenee, niin Mollier-kuviossa siirrytään vakiovesisisältösuoraa ylös- päin. Esimerkiksi kuviossa 4 ilmaa lämmitetään 5 astetta, jolloin siirrytään pisteestä A suoraan ylöspäin pisteeseen C, jossa lämpötila on 15 astetta ja ilman vesisisältö edel-

leen 6g/kg. Suhteellinen kosteus on noin 58 %. Kuivauksen aikana ilma kostuu ja seuraavaksi siirrytään jälleen alas oikealle pisteeseen D, jossa lämpötila on 10,2 astetta ja ilman vesisisältö 7,7 g/kg. Lasketaan jälleen ilmakilon veden sitominen eli  $7,7 \text{ g/kg} - 6 \text{ g/kg} = 1,7 \text{ g}$  vettä ilmakiloa kohden. Näin ollen ilman lämmittäminen vaikuttaa veden sitomiseen melkein 2,5-kertaisesti verrattuna lämmittämättömään ilmaan.



Kuvio 4. Mollier-piirros, jossa pisteet ilmaisevat lisälämmön vaikutusta kylmäilma-kuivurissa (Järvenpää ja Kivinen 1993).

## 4 POLTTOPUUN KUIVAUS

Kun polttopuuta tuotetaan ammattimaisesti, niin työn on oltava tehokasta ja turhat välivaiheet on tuotannosta karsittava pois, jottei työkustannus puumäärää kohden nouse kovin suureksi. Näitä välivaiheita ovat rasiinkaato, halkovälivaihe ja pilkkeiden pinoaminen. Pilkkeet olisi saatava koneen kuljettimelta suoraan kuivausyksikköön. (Pikkujämsä 2001, 8.)

Kun vuosittain myytävä polttopuumäärä on suuri, niin silloin tulee harkittavaksi pilkekuivurin rakentaminen, jotta tuotantoa pystytään tehostamaan. Kuivurin avulla saadaan parannettua pilkkeiden kiertonopeutta ja näin ollen varastointi- ja korkokustannukset alenevat. Myös polttopuusta saadaan tasalaatuisempaa. (Kouki 2001.) Polttopuun keinokuivauksessa pyritään pitämään ilma kierrossa pilkkeiden ympärillä, jolloin kosteuden haihtuminen on tehokasta. Pilkkeen kylmäilmakuivauksessa voidaan noudattaa osin samoja periaatteita, jotka on laadittu heinälle, hakkeelle ja muille eloperäisille materiaaleille. Pilkkeiden kuivauksessa huomioon on kuitenkin otettava pilkkeiden pieni tiheyskerroin ja niiden hidas kyky luovuttaa kosteutta. (Pikkujämsä 2001, 11-12.)

### 4.1 Perinteiset polttopuun kuivausmenetelmät

#### 4.1.1 Harva- tai avoseinäinen katos

Yleensä pilketuottajilla on käytössä varastohalli, jonne kosteat puut pilkotaan suoraan pilkekoneella. Varaston seinät voivat olla harvaa verkkoa tai laudoitusta. Lattia olisi hyvä olla betonia tai asfalttia, mutta myös vanhat hirret ja ratapölkyt käyvät, kun halutaan säästää kustannuksissa. Katto voi olla peltiä, joka on aukaistavissa täytön ajaksi. Räystäät on hyvä suunnitella riittävän pitkiksi, jotta syyssateet eivät kastele polttopuita sivusta. Kun katos tai halli sijoitetaan tuuliselle ja kuivalle paikalle, niin pilkkeet saadaan myyntikosteuteen jo yhden kesän aikana.

#### 4.1.2 Betoniverkkohäkki

Betoniverkkohäkeissä puu on pystytty kuivaamaan kesän aikana lähelle 20 %:n kosteutta. Betoniverkkohäkki koostuu yleensä kahdesta Euro-lavasta ja betoniverkosta. Pilkkeitä häkkiin menee lähes 5 i-m<sup>3</sup> eli 2 kiinto-m<sup>3</sup>, kun irtokuutiometrin tiiviyskerroin on 0,4. Yhden sivuista voi jättää avattavaksi. Häkkiä pystytään liikuttelemaan trukkipiikeillä varustetulla etukuormaimella. Häkit on kuitenkin hyvä peittää, jotta päällimmäiset pilkkeet eivät pääse kastumaan sateiden vaikutuksesta.

#### 4.1.3 Verkkosäkki ja pilkehäkki

Kun pilkkeiden siirtely ja jakelu halutaan koneellistaa, yleinen ratkaisu on verkkosäkki tai pilkehäkki. Verkkosäkki-menetelmässä puut varastoidaan muoviseen verkkosäkkiin, jonka alustana toimii tavallinen trukkilava. Pilkehäkissä trukkilavaa ympäröi metallinen häkki. Kumpaakin edellä mainittuun vaihtoehtoon sopii pilkkeitä noin 1,2 i-m<sup>3</sup>. Apuna säkityksessä käytetään säkitystelinettä, joka poistetaan säkin ympäriltä, kun se on täynnä. Menetelmän avulla pilkkeet kuivuvat nopeasti ja niitä on helppo siirrellä trukkipiikeillä varustetun etukuormaimen avulla. Menetelmän heikkoutena on hitaus, koska pilkkeen valmistus keskeytyy aina säkin tai häkin vaihdon ajaksi.

### 4.2 Polttopuiden keinokuivaus

#### 4.2.1 Yleistä pilkekuivureista

Pilkeyrittäjillä on koneelliseen kuivaukseen siirryttäessä usein edessä kuivurin rakentaminen. Kuivuri ei tarvitse välttämättä seiniä ja kattoa, vaan se voidaan perustaa yksinkertaisesti ja edullisesti eräänlaisena kehikkona, jota ympäröi pressu. Myös valmiita rakennuksia ja jollekin muulle materiaalille tarkoitettuja kuivureita voidaan käyttää tapauskohtaisesti. Hakkeelle, heinälle ja viljalle tarkoitettut kylmäilmakuivurit on kuitenkin mitoitettu suurille ilmamäärille, jolloin sähkökustannus pilkkeen kuivauksessa voi nousta suureksi. Pilkkeen kerrospaksuutta kasvattamalla näitä kuivureita voidaan kuitenkin hyödyntää. Ongelmaksi tosin voi muodostua monimutkainen pilkkeen käsittely, joka johtuu yleensä kylmäilmakuivurin seinistä ja ritilärakenteesta, jotka ovat este tehokkaalle, koneilla tapahtuvalle purkamiselle ja täytölle.

#### 4.2.2 Pilkekuivurin mitoittaminen

Varsinaisen pilkekuivurin leveys ja korkeus määräytyvät kevyessä kenttäkuivurissa pilkekoneen kuljettimen mittojen ja muun käytettävissä olevan kaluston mukaan. Pituus määräytyy puhaltimen paine-eron kestävyys mukaan. Tähän vaikuttaa pilkkeiden tiheys ja tarvittava ilmamäärä. Puhaltimena pilkekuivureissa käytetään yleensä potkuripuhallinta, koska se tuottaa suuren ilmamäärän alhaisella vastapaineella ja hankintahinnaltaan se on edullinen (Perttola 1994, 17). Pilkkeen kuivauksessa ilmamäärän ei tarvitse olla yhtä suuri kuin esimerkiksi hakkeella ja viljalla, koska pilkkeen virtausvastus on pieni. Ohjeellisena ilmamääränä pilkkeen kuivauksessa voidaan pitää noin 200 kuutiota ilmaa/tunti/ $\text{m}^3$  pilkettä. (Pikkujämsä 2001, 19.)

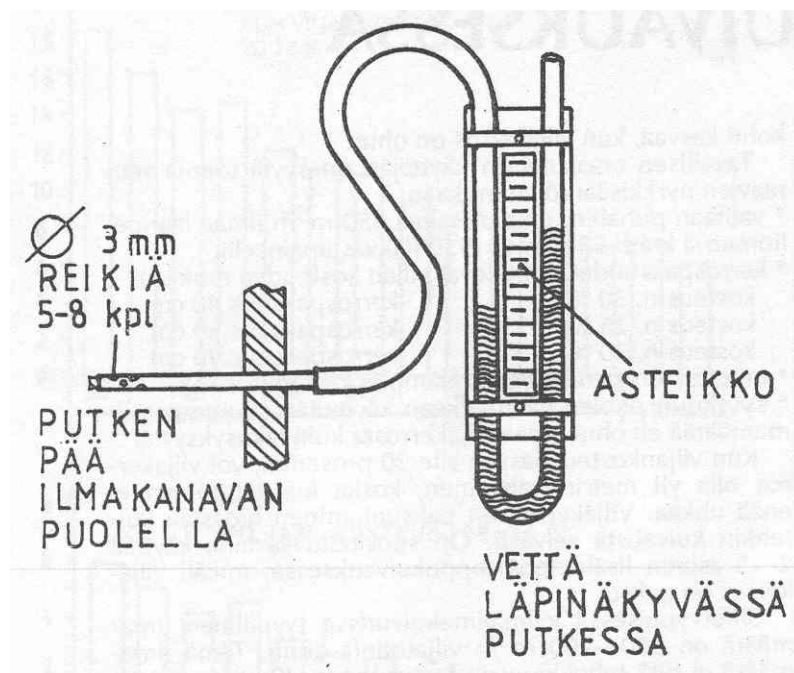
Puhaltimen ilmamäärä voidaan myös laskea kuivurin pohjan pinta-alan mukaan. Ilman virtausnopeudeksi pilkekerroksessa suositellaan 360-720 m/h (Perttola 1994, 17). Kuivurin pinta-alan ollessa  $50 \text{ m}^2$ , niin tarvittava ilmamäärä on silloin  $50 \text{ m}^2 \cdot 360-720 = 18\,000-36\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Lisäksi ilmamäärän valintaan vaikuttaa pilkkeen kerrospaksuus. Ilmamäärän ollessa liian suuri suhteessa puumäärään, tapahtuu vastapaineen voimakas kasvaminen. Ilmiö voidaan myös huomata ulostuloilman kosteuden mittauksella tai lämpötilan tarkkailulla. Tällöin kuivausilma ei sido kosteutta riittävästi, joka voi johtua myös siitä, että kuivuria ei sammuteta välillä ja anneta puun kosteuden nousta pintaan. Näin ollen kuivausilma ei voi sitoa puun kosteutta.

#### 4.2.3 Vastapaine pilkekuivurissa

Pilkekuivurissa ilmaa joko puhalletaan tai imetään, jolloin puhutaan yli- tai alipaineella tapahtuvasta kuivauksesta. Pilkkeen kuivauksessa alipaine on todettu paremmaksi vaihtoehdoksi. Eduiksi voidaan lukea ilmavirran helpompi ohjailtavuus erikokoisissa pilkekasoissa. Myös auringon tuoma lisälämpö on helpommin hyödynnettävissä. Myös monikäyttökuivurin puhallussuunta voi joissain tapauksissa olla järkevää kääntää imeväksi. (Pikkujämsä 2001, 16.)

Monikäyttöisissä kylmäilmakuivureissa vasta-painetta aiheuttaa kuivattava materiaali, sen kerrospaksuus sekä ilmakehän välijohto. Ilmakehän aiheuttama vastapaine pysyy kohtuullisena, kun ilman nopeus ei nouse yli 5 m/s (Järvenpää ja Kivinen 1993, 10). Monikäyttöisissä kylmäilmakuivureissa pilkkeiden tiheys ja käytettävä ilmamäärä

ovat niin pieniä, että kerrospaksuutta voidaan nostaa aina 4-5 metriin saakka. Matala pilkekasa aiheuttaa olemattoman vasta-paineen, joten varmin tapa mitata paine, on käyttää paine-eromittaria (kuva 1). Mittarin muoviletkun toinen pää on vapaasti ilmassa ja toinen pää on kuivurin pääilmakanavassa loppupään tuntumassa. Vesipatsaiden korkeusero kertoo pääkanavassa vallitsevan paineen. Vesipatsaiden korkeuserossa yksi millimetri vastaa 10 pascalia. Kevytrakenteisissa kenttäkuivureissa viiden metrin auman on todettu aiheuttavan vastapainetta hieman yli 100 Pascalia. (Pikkujämsä 2001, 19-20.)



Kuva 1. Omatekoinen painemittari (Järvenpää ja Kivinen 1993).

#### 4.2.4 Pilkekuivurin käyttö

Pilkkeiden kylmäilmakuivauksen aika rajoittuu käytännössä neljään kuukauteen eli toukokuusta elokuulle (kuvio 5). Muina aikoina ilman suhteellinen kosteus on liian korkea kuivaukseen. Pilkettä voidaan kuivata noin 3-8 tuntia päivässä. Jaksotus on muistettava pilkkeen kuivauksessa, koska pilkkeet luovuttavat kosteutta hitaasti. Kuivaus tulee suorittaa kuumimpaan ja kuivimpaan vuorokaudenaikaan. Puun kosteuden luovutus hidastuu kuivumisen edetessä, joten kuivauksen loppuvaiheessa kuivatus ilman suhteellinen kosteus ei nouse enää niin korkealle kuin alkuvaiheessa.





siä ei tulisi. Käyttäjän kannalta kaikki automaattiohjaus versiot helpottavat työtä ja jaksottaminen onnistuu paremmin. (Järvenpää ja Kivinen 1993, 16-17.)

#### 4.2.5 Lisälämmön käyttö kuivauksessa

Kuivausta voidaan tehostaa merkittävästi lämmittämällä kuivausilmaa. Esimerkiksi yhden asteen lämpötilan nousu pudottaa ilman suhteellista kosteutta 5 prosenttiyksiköä ja ilman kuivauskyky kasvaa. Lämmitystehon tarve on yhden asteen lämpötilan nousua varten noin 0,35 W / ilmakeuutio / tunti (Järvenpää ja Kivinen 1993, 13). Lisälämmön käyttö kuivauksessa tuo helposti kustannuksia ja näin ollen lisälämpövaihtoehtoja aurinko on ensisijainen lämmönlähde. Yksinkertaisimmillaan auringon lämpöenergiaa voidaan hyödyntää asfaltoimalla kuivurin ympäristö ja varsinkin kohta, josta imetään kuivausilmaa kuivuriin.

Kun kuivauskautta halutaan pidentää esimerkiksi huhtikuusta lokakuun loppuun saakka, joudutaan harkitsemaan muita lämmönlähteitä. Yleensä kylmäilmakuivureissa käytetään öljykäyttöisiä rakennuskuivureita. Sähkölämmittintä voidaan käyttää ainoastaan pienissä kuivureissa. Myös lämpökeskuksen hyödyntäminen voi olla ratkaisu. Tällöin lämpökeskuksesta vedetään kanaaliputket kuivuriin. Kuivurissa on lämpöpatteri, jonka tuottama lämpö hyödynnetään kuivauksessa. Ratkaisu on varsin käyttökelpoinen, jos lisälämmön tarve on suunnilleen yhtä suuri kuin muu lämmitystarve yhteensä. Jos muu lämmöntarve on selvästi vähäisempi kuin lisälämmön tarve, niin silloin lämpökeskuksen hyödyntäminen on kyseenalaista, koska ainoastaan kuivuria varten ei kannata investoida tehokasta lämpökeskusta. Tilalla lämpökeskuksen tuottama lämpö voidaan tuottaa polttamalla esim. jätepuuta kattilassa, jolloin päästään edullisiin kustannuksiin.

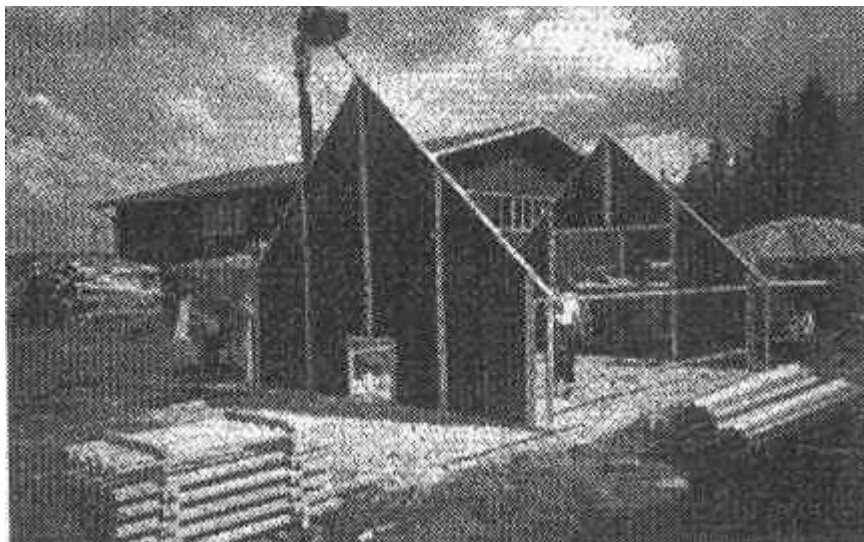
Puun kuivaus korkeissa lämpötiloissa voi aiheuttaa puun halkaisupinnan nopean kuivumisen ja tällöin syvemmällä oleva kosteus ei pystykään haihtumaan (Pikkujämsä 2001, 20). Seurauksena puun sisäosa jää kosteaksi. Sahatavara kuivaamoissa ilmiö estetään kierrättämällä osa puhallusilmasta kuivurista, jotta poistettavan ilman suhteellinen kosteus nousee 100 prosenttiin. Näissä kuivaamoissa ilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa myös ohjataan ennalta laadittujen kuivauskaavojen perusteella.

## 5. PILKEKUIVURITYYPIT

### 5.1 Siirrettävä kuivuri

Polttopuukauppias ja maanviljelijä Pentti Romo Vihdistä on yhdessä Työteho-seuran kanssa kehittänyt uudentyyppisen kevytrakenteisen siirrettävän kuivurin (kuva 2).

Kuivuri ei vaadi perustuksia vaan se lukitaan alustaansa maakiilloilla. Pystytys ja purkaminen käyvät helposti kahdelta mieheltä, kun käytössä on puutavarakuormain. Kuivuriin mahtuu kerrallaan noin 70 i-m<sup>3</sup> pilkkeitä.



Kuva 2. Siirrettävä kuivuri koostuu kevyistä elementeistä (Kouki 2001).

Terminaaliin tuotu puutavara katkotaan ja halkaistaan pilkontakoneella. Pilkkeet siirretään kuivuriin kuljettimella ja kuivurin täytyttyä katto rullataan kiinni. Tämän jälkeen voidaan aloittaa koneellinen kuivaus. Sään ollessa aurinkoinen ja lämmin kuivaus voidaan suorittaa käyttämällä kylmäilmakuivausta. Jos sää on kylmä, lisälämpöä voidaan käyttää, joka tuotetaan yleensä öljyllä. Tärkeintä on kuitenkin päästä heti kuivaamaan ja että pilkkeet ovat suojassa sään vaikutuksilta.

Pilkkeet voidaan varastoida kuivurissa ennen myyntiä, jolloin vältetään turhia siirtoja varastojen välillä. Säätila voi muuttua varastoinnin aikana sateiseksi ja pilkkeet imevät kosteutta ilmasta. Tällöin hometta saattaa esiintyä pilkkeitten päädyissä. Tämä voidaan kuitenkin estää puhaltamalla lämmintä ilmaa kuivuriin. Näin varmistetaan pilkkeitten hyvä laatu.

Kuivurin tyhjennys suoritetaan puutavarakuormaimella, jonka kouraan on kiinnitetty lisäpiikit (kuva 3). Tyhjennys suoritetaan suoraan kuorma-autoon ja kuljetetaan tämän jälkeen asiakkaalle. Kuivurilla voidaan myös kuivata muita raaka-aineita, kuten esimerkiksi heinää. Lisäksi kuivurin toisessa päädyssä on pariovet, jolloin tyhjää kuivuria voidaan vaihtoehtoisesti käyttää varastona.



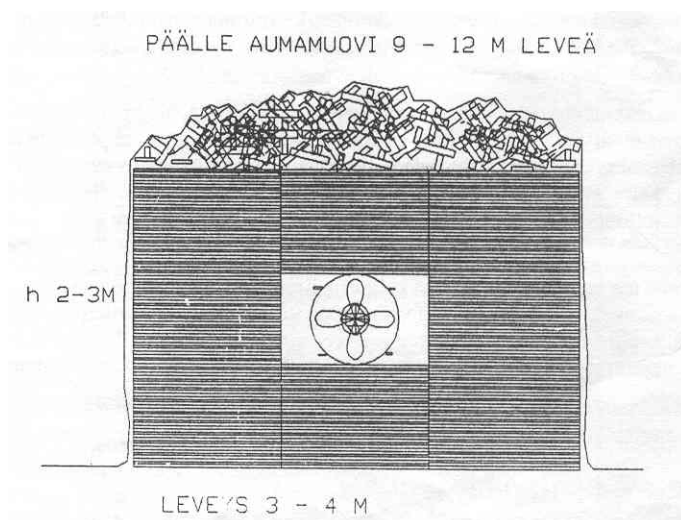
Kuva 3. Siirrettävän kuivurin tyhjennys tehdään rehupiikein varustetulla puutavara-kuormaimella (Rinne 2001).

Työteho-seuran kesällä 2000 tekemien mittausten perusteella kuivaustulos oli tasainen koko kuivurin alueella. Ainoastaan uloimmissa nurkissa oli muutamia pilkkeitä, joissa oli hometäplä. Syynä tähän oli kesän sateiset ilmat, jolloin puhallinta ei voitu käyttää ja sen vuoksi nurkkiin pääsi kondensoituman vettä. Puhallimen toimintaa ohjattiin ulkoilmaan sijoitetulla hygroskoopilla. Puhallin käynnistyi automaattisesti, kun ilman suhteellinen kosteus oli laskenut säädetylle tasolle. Puhallusilman määräksi on arvioitu 300 kuutiota tunnissa pilke  $\text{m}^3$  kohti. Puhalltimena käytetään 4 kW:n potkuripuhallinta, jonka halkaisija on 80 cm.

## 5.2 Kevytrakenteinen kenttäkuivuri

Kenttäkuivuri perustuu hakkeen, palaturpeen ja heinän kenttäkuivauksessa hyväksi todettuun ratkaisuun, jossa hyödynnetään alipainetta. Kuivauksen nopeuttamiseksi voidaan käyttää aurinkoenergiaa. Kenttäkuivurin leveys ja korkeus riippuvat käytettävästä kuljettimesta ja muusta kalustosta, jota käytetään pilkkeiden käsittelyssä. Kuivauspituuteen taas vaikuttaa puhaltimen paine-eron kestävyys, johon pituuden lisäksi vaikuttavat poikkileikkauspinta-ala ja materiaalin tiheys. Kenttäkuivuri perustuu alipaineeseen eli puhallin imee ilman klapikerroksen läpi toisen avonaisen pään kautta. Kuivuminen etenee peräosasta puhallinta kohti ja kuivia puita voi säkittää kuivumisen tahdissa.

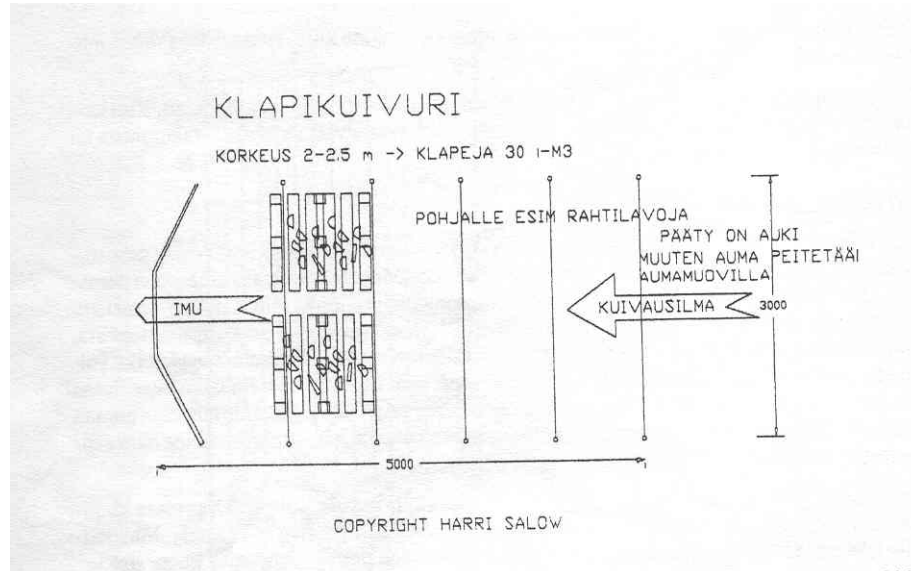
Kenttäkuivurin on suunnitellut Harri Salow Lapin Maaseutukeskuksesta. Hän on perehtynyt pilkkeen keinokuivaukseen. Rakenteet koostuvat potkuripuhaltimesta, päällä olevasta aumamuovista tai pressusta sekä pääty- ja sivurakennelmista, jotka voivat olla verkkoa tai harvaa laudoitusta (kuva 4). Myös tässä kuivurityypissä rakenteet ovat melko helposti siirreltävissä. Peitemuovi tai –pressu kiinnitetään auman päälle reunoistaan ja puhaltimen puoleisesta päädyistä.



Kuva 4. Kenttäkuivurissa toinen pääty koostuu imevästä potkuripuhaltimesta ja tiivistä seinästä (Pikkujämsä 2001).

Pohjarakenteeksi ei teoriassa tarvitsisi mitään, koska ilma kulkee myös alimmissa kerroksissa. Kuitenkin koneellinen kuormaus aiheuttaa omat ongelmansa, jos vastassa

on pehmeä maapohja. Tällöin pilkkeet helposti painuvat siihen eli maapohjan olisi hyvä olla kovaa materiaalia tai siinä olisi hyvä käyttää esimerkiksi rahtilavoja (kuva 5).



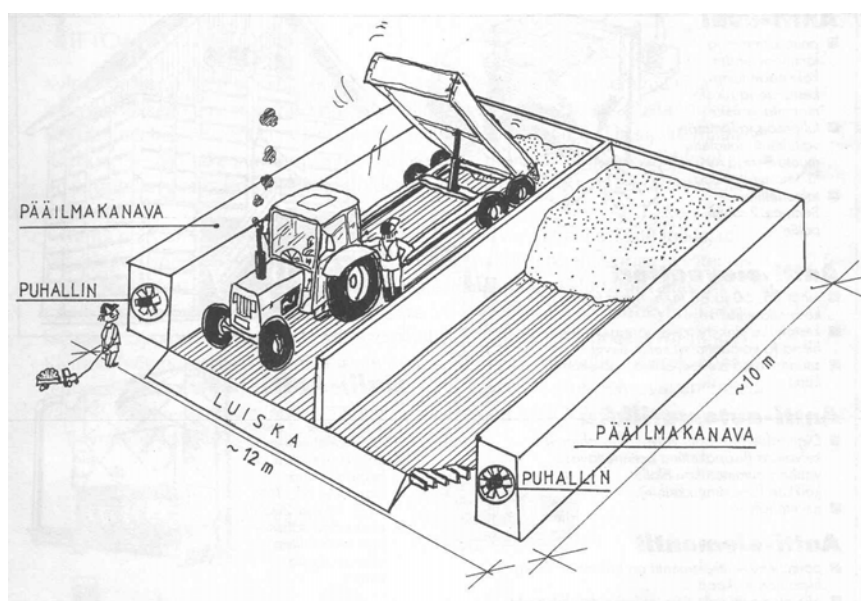
Kuva 5. Kuivurin pohja voi koostua rahtilavoista (Pikkujämsä 2001).

Kenttäkuivurin sijoittamisella on tärkeä osuus kuivauksen onnistumiseen. Sijoituskohteen valinnalle voidaan käyttää samoja perusteita, kuin luonnonkuivauksessakin. Kuivurin ilmanottoaika tulisi järjestää niin, että ilma olisi mahdollisimman kuivaa ja lämmintä. Näin ollen sellaiset paikat eivät tule kysymykseen, jotka ovat varjoisia ja joiden maaperä on märkää. Paras sijoituspaikka kenttäkuivurille on korkea paikka ja alustana mielellään asfalttikenttä, jolloin ilmanlämpötila on useita asteita ympäristöä korkeampi. Poistoilman johtamisessa on huomioitava, ettei kostea ilma pääse takaisin kuivuriin.

Puhaltimen koko määräytyy kuivausajan, -ajankohdan ja kuivattavan määrän perusteella. Suositeltava ilman virtausnopeus on 100-200 mm/s eli 360-720 m/h (Perttola 1994, 18). Tähän riittää 40 m<sup>2</sup>:n kenttäkuivurissa 4 kW:n puhallin 80 cm:n potkurilla, koska vastapaine ei pääse nousemaan pilkekerroksessa liian suureksi.

### 5.3 Ajonkestävä monikäyttökuivuri

Ajonkestävän monikäyttökuivurin rakenne vastaa perinteistä kylmäilmakuivuria, mutta kuivurin pohjarakenne kantaa koneiden painon (kuva 6). Monikäyttökuivurin periaatteena on se, että sillä voidaan kuivata useita eri tuotteita, jolloin pääomakustannukset jakaantuvat ja kuivurin vuosittainen käyttöaika pitenee. Kuivausajan ulkopuolella kuivuria voidaan käyttää varastona. Kuivuri voidaan myös rakentaa tilalla jo olemassa oleviin rakennuksiin, kuten esimerkiksi konehalliin. Monikäyttökuivurilla voidaan kuivata useita eri materiaaleja, kuten esimerkiksi viljaa, heinää, haketta, pilkettä, yms.

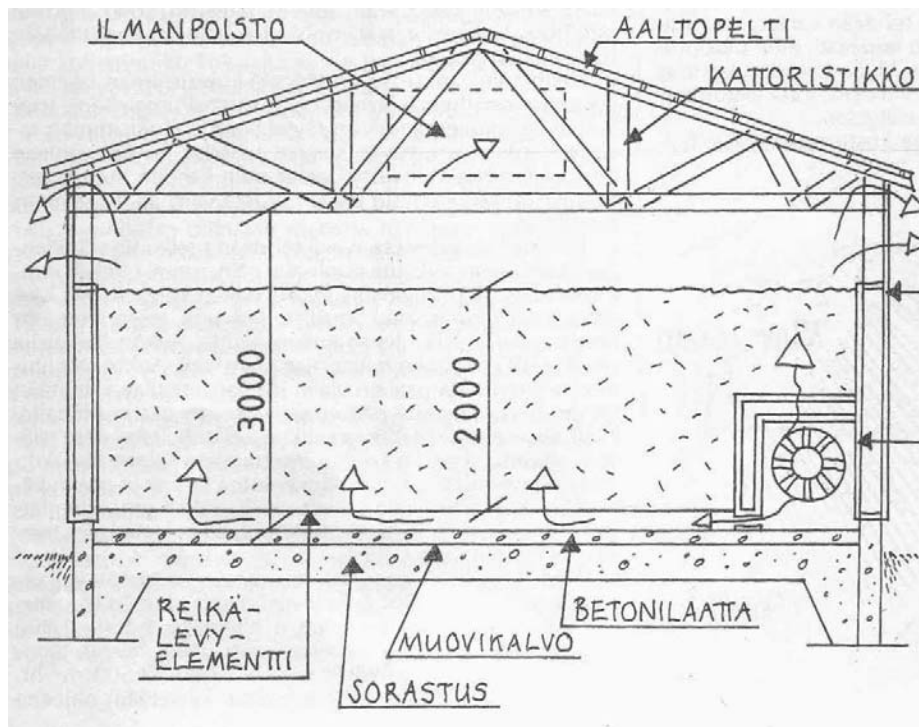


Kuva 6. Ajonkestävän monikäyttökuivurin peruseriaate näkyy kuvassa (Järvenpää ja Kivinen 1993).

Ajonkestävässä monikäyttökuivurissa etuna on se, että materiaalin käsittely voidaan tehdä erilaisilla traktoriin kytkettävillä koneilla. Kuivuri voidaan täyttää peruuttamalla perävaunu laariin ja kippaamalla kuorma, myös etukuormainta voidaan käyttää apuna. Tyhjennys voidaan tehdä etukuormaimella tai esimerkiksi puutavarakuormaimella, johon on laitettu rehupiikit, jolloin pilkkeet pysyvät siinä paremmin.

Pohjarakenne koostuu kahdesta rakenteellisesta ja toiminnallisesta osasta eli kantavasta ilmatilasta ja pintamateriaalista (kuva 7). Kantavan ilmatilan tehtävä on kantaa koneiden paino, luoda edellytykset riittävän suuren ilmamäärän tasaiseen jakautumiseen koko kuivausosalalle ja tukea pintamateriaalia. Kantava ilmatila voidaan tehdä puusta,

rakennuslevyistä, harkoista tai betonista. Ilmatilan on oltava puhdistettavissa, koska pinnan läpi varisee roskia. Ilmatilan korkeus vaihtelee välillä 20-35 cm. Pintamateriaali valitaan siten, että sen läpi pääsee riittävästi kuivausilmaa ja se kestää koneellisen materiaalin käsittelyn. Pintamateriaalina voidaan käyttää reikälevyä, kuivauspalkkia tai viiramattoa. Reikälevyissä on halkaisijaltaan 3 mm oleva rei'itys.



Kuva 7. Ajonkestävän monikäyttökuivurin rakenne (Järvenpää ja Kivinen 1993).

## 5.4 Lämminilma konttikuivuri

Tämä Yhdysvalloissa käytettävä pilkekuivurityyppi otettiin mukaan vertailulaskelmiin, koska pilkeyrittäjillä oli runsaasti mielenkiintoa ympärivuotiseen lämminilma-kuivaukseen. Kuivuri on rakenteeltaan 12,2 metriä pitkä merikontti, joka on eristetty ulkopuolelta. Kontissa on halkaisijaltaan 1,5–1,8 -metrinen tuuletin, joka on asennettu kontin takaseinälle. Tuuletinta pyörittävä moottori on kontin ulkopuolella ja ilmanpoistoaukossa on oma tuuletin. Kuivausilman lämpötilana pidetään 74-88 astetta ja ilma lämmitetään puuta polttamalla.



Tässä tapauksessa pilkkeet kuivataan metallihäkeissä, jotka ovat tilavuudeltaan 3,0 i-m<sup>3</sup> (kuva 8). Konttiin niitä mahtuu 18 kappaletta eli 54 i-m<sup>3</sup>. Häkkeitä käsitellään koneellisesti trukilla. Häkkien on oltava metallia, jotta ne kestävät korkeita lämpötiloja. (Rinne 2001, 59.)



Kuva 8. Lämminilma konttikuivuri (Rinne 2001).

## 6. TULOKSET

### 6.1 Kuivausajat

#### 6.1.1 Siirrettävä kuivuri

Kuivausaika siirrettävässä kylmäilmakuivurissa riippuu poistettavasta vesimäärästä, käytetystä ilmamäärästä ja kunkin ilmakeuution mukana poistuvasta vesimäärästä. Poistettavaan vesimäärään vaikuttaa alku- ja loppukosteus sekä kuivattavan pilkkeen määrä. Haihdutettava vesimäärä voidaan laskea, kun tiedetään pilke-erän paino ennen kuivausta tai sen jälkeen. Seuraavaa kaavaa voidaan käyttää, kun pilke-erän paino tiedetään kuivauksen jälkeen.

$$\text{vesimäärä (kg)} = \frac{\text{alkukosteus} - \text{loppukosteus (\%)}}{100 - \text{alkukosteus (\%)}} * \text{kuivamassa (kg)}$$

Tuoreen koivupilkkeen alkukosteus on 45 % ja vaatimus loppukosteudeksi 20 %. Taulukon 1 mukaan kuivattujen koivupilkkeiden paino 20 % kosteudessa on 248 kg/i-m<sup>3</sup>. Taulukossa on pilkkeen painot eri puulajeilla tiiviyskertoimen ollessa 0,4 eli irtokuutiometri ja 0,63 eli pinokuutiometri. Kosteus on luokiteltu joko 20 % tai 30 %.

$$\text{vesimäärä kg / i - m}^3 = \frac{45 \% - 20 \%}{100 - 45 \%} * 248 \text{ kg} = 112,7 \text{ kg / i - m}^3$$

Taulukko 1. Pilkkeiden irtotiheyksiä eri puulajeilla (Virtala ym.1984).

Puulaji	Irtotiheys kg/m <sup>3</sup>			
	Kiintopuupitoisuus			
	0,4		0,63	
	Kosteus		Kosteus	
	20 %	30 %	20 %	30 %
Koivu	248	283	390	446
Leppä	183	209	288	328
Mänty	202	231	319	364

Poistettavan veden määrä kuivauserästä lasketaan seuraavasti:

$$70 \text{ i} - \text{m}^3 * 112,7 \text{ kg} / \text{i} - \text{m}^3 = 7889 \text{ kg}$$

Ulkoilman keskimääräisen vedensitomiskyvyn oletetaan olevan noin 2 g/m<sup>3</sup> Mollier-diagrammin mukaan. Ohjeellisena ilmamääränä pilkkeen kuivauksessa pidetään 200 kuutiota ilmaa/tunti/i-m<sup>3</sup> pilkettä. Siirrettävää pilkekuivuria voi käyttää kuitenkin myös muiden materiaalien kuivaukseen, joten laskelmissa käytetään korkeampaa ilmamäärää eli 300 kuutiota ilmaa/tunti/i-m<sup>3</sup> pilkettä. Näin ollen tarvittava kuivausilman määrä on  $70 \text{ i} - \text{m}^3 * 300 \text{ kuutiota ilmaa/tunti/i} - \text{m}^3 = 21\,000 \text{ m}^3/\text{h}$  eli 25 200 kg/h, kun muistetaan ilmakuution paino 1,2 kg. Puhaltimena käytettäisiin 4 kW:n moottorilla ja halkaisijaltaan 80 cm:n potkupuhaltimella varustettua mallia. Veden poistuminen tunnissa olisi tällöin  $25\,200 \text{ kg/h} * 2 \text{ g/kg} = 50\,400 \text{ g/h} = 50,4 \text{ kg/h}$ . Kuivausaika voidaan laskea seuraavan kaavan avulla.

$$\text{kuivausaika } h = \frac{\text{poistettava vesimäärä g}}{\text{ilmamäärä kg/h} * \text{ilmakilon vedensidontakyky g/kg}}$$

$$\text{kuivausaika } h = \frac{7889\,000 \text{ g}}{25\,200 \text{ kg/h} * 2 \text{ g/kg}} = 156,5$$

Kuivausajaksi tuli kaavan perusteella noin 157 tuntia. Jos kuivuria pidetään päällä noin 8 tuntia vuorokaudessa, niin kuivausajaksi saadaan  $157\text{h}/8\text{h}=19,6$  päivää. Kuivausta hidastavat kuitenkin sadepäivät, jolloin ilman suhteellinen kosteus on niin korkea, että hygroskoopin avulla käynnistytävä puhallin ei toimi. Mikäli säätila muuttuu kuiva-

uksen aikana pitemmäksi aikaa sateiseksi, voidaan pilkkeiden homehtuminen estää puhaltamalla kuivuriin lämmintä ilmaa.

### 6.1.2 Kiinteä monikäyttökuivuri

Kiinteällä monikäyttökuivurilla voidaan tässä esimerkissä kuivata kerrallaan 500 i-m<sup>3</sup> pilkettä. Pilkkeen lähtötietoina käytetään samoja arvoja kuin siirrettävässä kuivurissa-kin. Lasketaan poistettava vesimäärä.

$$500 \text{ i} - m^3 * 112,7 \text{ kg/i} - m^3 = 56\,350 \text{ kg}$$

Ulkoilman keskimääräisen vedensitomiskyvyn oletetaan olevan noin 2 g/m<sup>3</sup> Mollier-diagrammin mukaan. Ilmamääränä monikäyttökuivurissa pidetään 300 kuutiota ilmaa/tunti/i-m<sup>3</sup> pilkettä, jolloin se soveltuu myös hakkeen kuivaukseen. Hakkeen kuivauksessa käytetään 2 metrin kerrospaksuutta, mutta pilkkeen kuivauksessa kerrospaksuus voi olla noin 4-5 metriä kesäaikaan ja keväällä ja syksyllä 3-4 metriä (Perttola 1994, 18). Tässä laskelmassa käytetään neljää metriä. Näin ollen tarvittava kuivausilman määrä on 500 i-m<sup>3</sup> \* 300 kuutiota ilmaa/tunti/i-m<sup>3</sup> pilkettä = 150 000 m<sup>3</sup>/h eli 180 000 kg/h, kun muistetaan ilmakeuuden paino 1,2 kg. Puhaltimena käytettäisiin kahta 11 kW:n moottorilla ja halkaisijaltaan 100 cm:n potkupuhaltimella varustettua mallia. Veden poistuminen tunnissa olisi tällöin 180 000 kg/h \* 2 g/kg = 360 000 g/h = 360 kg/h. Lasketaan kuivausaika pilkkeelle.

$$\text{kuivausaika } h = \frac{56\,350\,000 \text{ g}}{180\,000 \text{ kg/h} * 2 \text{ g/kg}} = 156,5$$

Kuivausajaksi muodostuu kiinteälle kuivurille sama aika, kuin siirrettävällekin kuivurille, johtuen samasta kuivausilman määrästä, sekä samoista puun kosteuspitoisuuksista.

### 6.1.3 Kevytrakenteinen kenttäkuivuri

Kiinteällä monikäyttökuivurilla voidaan tässä esimerkissä kuivata kerrallaan 500 i-m<sup>3</sup> pilkettä. Pilkkeen lähtötietoina käytetään samoja arvoja kuin siirrettävässä kuivurissa-kin. Lasketaan poistettava vesimäärä.

$$100 \text{ i} - \text{m}^3 * 112,7 \text{ kg/i} - \text{m}^3 = 11\,270 \text{ kg}$$

Ulkoilman keskimääräisen vedensitomiskyvyn oletetaan olevan noin 2 g/m<sup>3</sup> Mollier-diagrammin mukaan. Ilmamääränä kenttäkuivurissa pidetään Harri Salowin suosittelema 200 kuutiota ilmaa/tunti/i-m<sup>3</sup> pilkettä. Näin ollen tarvittava kuivausilman määrä on 100 i-m<sup>3</sup> \* 200 kuutiota ilmaa/tunti/i-m<sup>3</sup> = 20 000 m<sup>3</sup>/h eli 24 000 kg/h, kun muistetaan ilmakeuution paino 1,2 kg. Puhaltimena käytettäisiin 4 kW:n moottorilla ja halkaisijaltaan 80 cm:n potkupuhaltimella varustettua mallia. Veden poistuminen tunnissa olisi tällöin 24 000 kg/h \* 2 g/kg = 48 000 g/h=48 kg/h. Lasketaan kuivausaika pilkkeelle.

$$\text{kuivausaika } h = \frac{11\,270\,000 \text{ g}}{24\,000 \text{ kg/h} * 2 \text{ g/kg}} = 234,8 \text{ h}$$

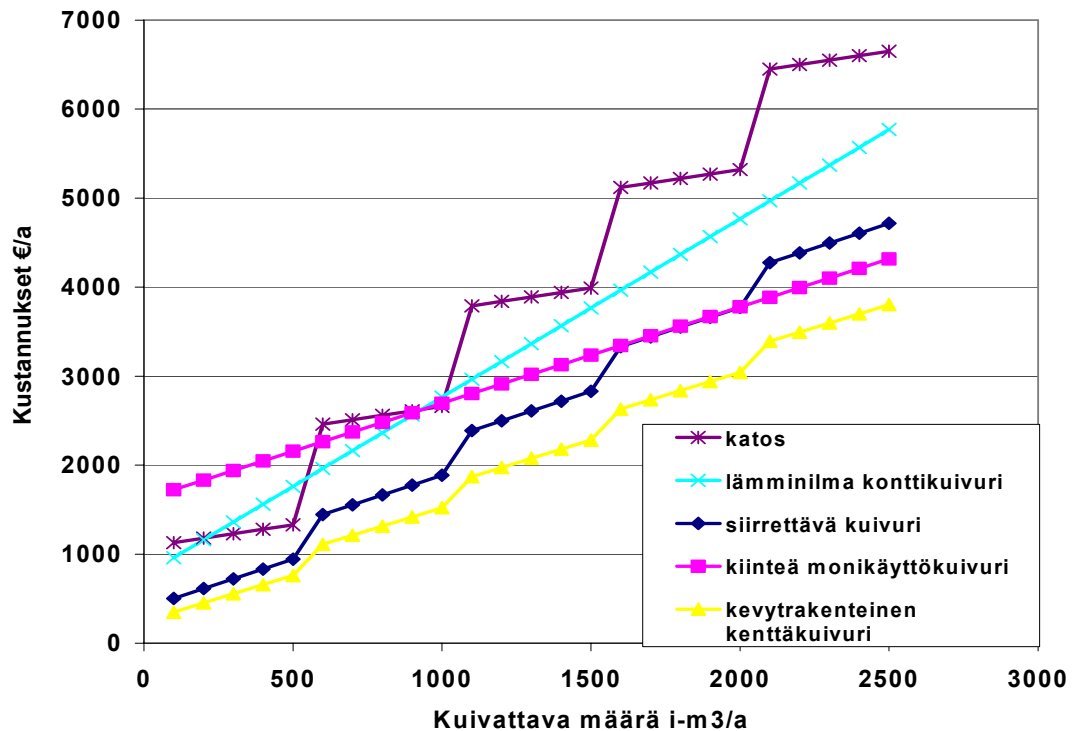
Kuivausajaksi muodostuu kenttäkuivurille 234,8 tuntia, joka on 8 tunnin kuivauspäivinä noin 29 päivää eli käytännössä kuukausi, jos keliolosuhteet ovat suotuisat. Kesäsa kuivurilla voisi teoriassa kuivata 5 erää, mutta käytännössä se ei tule onnistumaan ilman lisälämpöä.

### 6.1.4 Lämminilma konttikuivuri

Kun ilman lämpötila konttikuivurissa on keskimäärin 80 astetta, niin silloin ilman vedensidontakyky on 23,8 g/m<sup>3</sup>. Kuivausilmaa tarvitaan pilke i-m<sup>3</sup> kohti tunnissa noin 444 ilmakeuutiota. Kuivausajaksi on arvioitu näillä arvoilla keskimäärin 6 vuorokautta. Arvioitu sähkönkulutus on 10,7 kWh/i-m<sup>3</sup> ja lämmönkulutus 100 kWh/i-m<sup>3</sup>. (Rinne 2001, 85-86.) Liitteessä 4 on laskettu taloudelliset kustannukset konttikuivurille.

## 6.2 Kuivauksen kustannukset

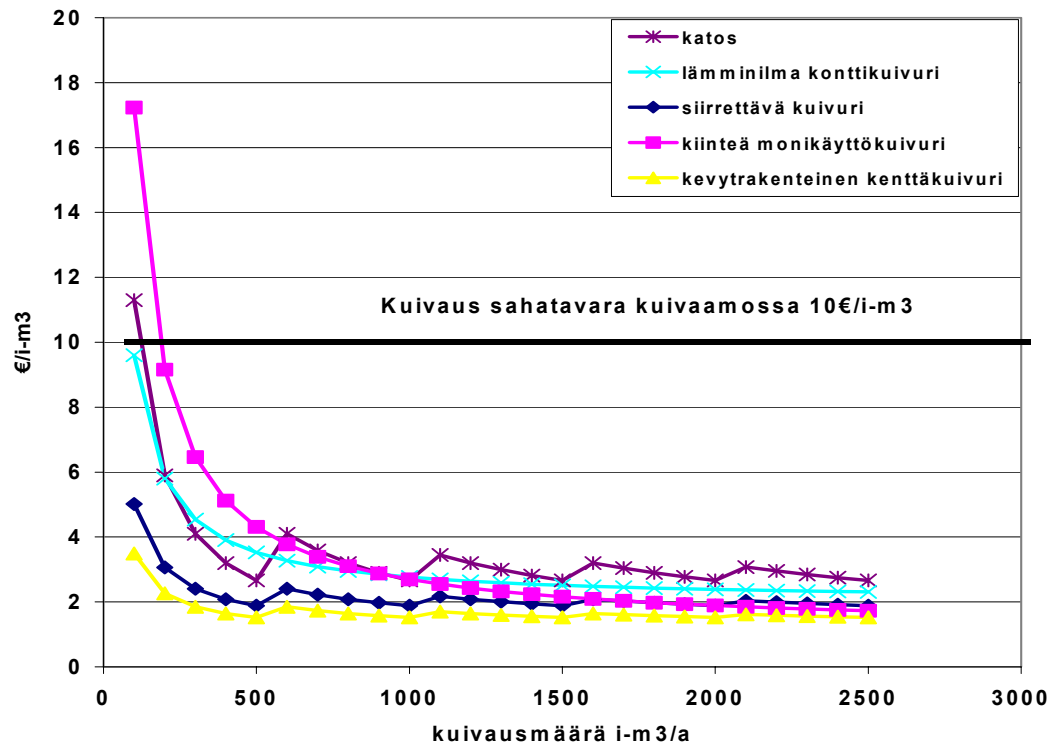
Pilkkeen keinokuivauksen kustannuksia vertailtiin keskenään eri vaihtoehtoilla. Eri vaihtoehtojen kustannukset ovat liitteissä. Vaihtoehtoina olivat kaikki pilkekuivurit ja vertailukohdaksi otettiin perinteisistä puunkuivausmenetelmistä polttopuukatos, jonka arvoksi määriteltiin 12 000 euroa ja kuivauskapasiteetiksi 500 i-m<sup>3</sup>/vuodessa. Lähtötilanteessa kiinteälle monikäyttökuivurille laskettiin ainoastaan kuivuriosan kustannukset, 17 000 €. Tähän ei kuulu varsinaisen kuivaamorakennuksen hinta, joka olisi ohjekustannuksilla ollut noin 28 000 €, joka on pilketuotannosta puhuttaessa erittäin kova hinta. Lisäksi monikäyttökuivuri ei ole mikään ratkaisu pilketuotantoon, vaan se on enemmänkin tarkoitettu muille materiaaleille. Kuviossa 6 siirrettävä kuivuri, kevytrakenteinen kuivuri ja katoskäyrä tekevät äkillisiä hintanousuja, koska niiden kapasiteetti ei riitä kuivaamaan kuin rajoitetun määrän vuodessa. Sen sijaan monikäyttökuivurin ja konttikuivurin kapasiteetti riittää kuivaamaan vuodessa yli 2000 i-m<sup>3</sup>, mutta monikäyttökuivuria käytettäessä tulos on ylioptimistinen, koska säät vaihtelevat. Sen sijaan konttikuivurille sää ei ole mikään este kuivauksessa, mutta lämmöstä johtuvat kustannukset näkyvät kokonaiskustannuksissa.



Kuvio 6. Kokonaiskustannukset vuodessa eri vaihtoehtojilla.

Kuvion 7 kuivauskustannuksia vertailtaessa huomataan, että sahatavara-kuivaamon käyttö ei ole kilpailukykyistä. Hinta pysyy myös samana kaikilla tuotantomäärillä, koska kuivauksesta laskutetaan kiinteä hinta (€/i-m<sup>3</sup>). Kuivauskustannukset ovat kaikilla kuivausmenetelmillä noin 2 euron tuntumassa.

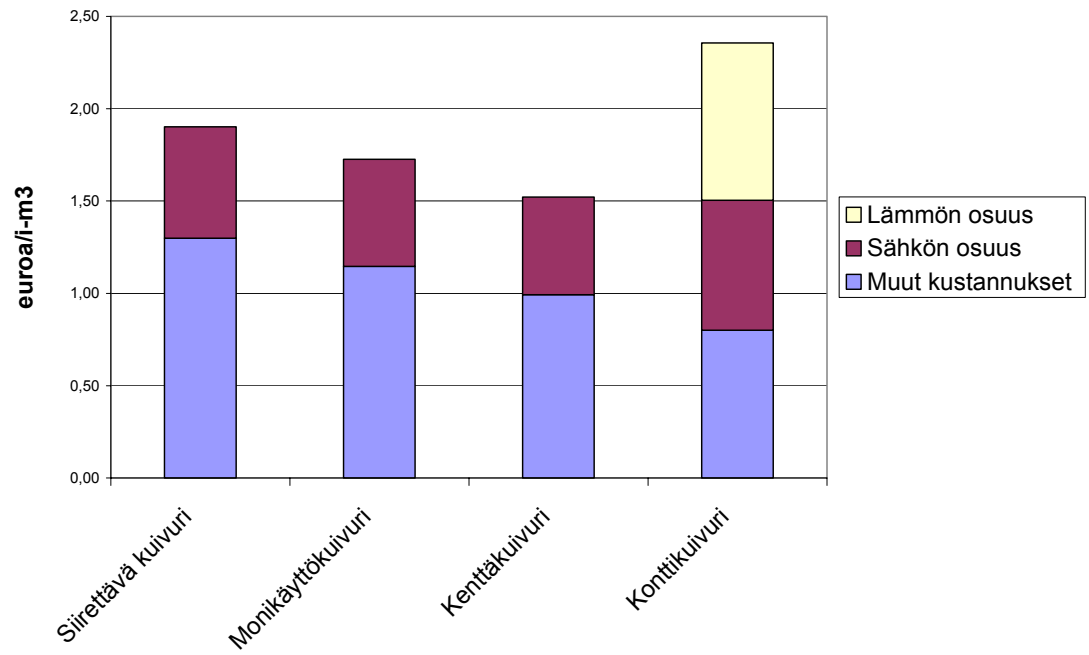
Kuivattaessa 2000 i-m<sup>3</sup> puuta kevyt kenttäkuivuri on halvin. Kuivureista konttikuivuri on kallein. Konttikuivurilla toiminta saadaan lähes ympärivuotiseksi ja kuivausmäärät suureksi. Kontilla myös pystytään melko nopeasti tarttumaan pilkkeen kysynnän vaihteluihin, joka on yksi keinokuivauksen tarkoitus. Siirrettävän kuivurin tärkeintä periaatetta, siirrettävyyttä ei laskelmissa ole huomioitu. Kuivuria pystytettäessä olisi silloin huomioitava sähköliittymän hankinta, koska sitä harvemmin on valmiina puun tienvarsivarastoilla. Näin ollen polttopuuterminaali sijaitseekin yleensä paikalla, jossa sähköä on saatavissa.



Kuvio 7. Pilkkeen kuivauskustannukset €/i-m<sup>3</sup>.

Sähkön osuus kustannuksista on kaikilla kuivureilla lähes sama, johtuen samoista il-  
mamääristä, joita puhalluksessa käytetään (kuvio 8). Konttikuivurilla lisälämpö nostaa  
sen kalleimmaksi vaihtoehdoksi. Sen sijaan se on varmin vaihtoehto, kun kuivattavat  
määrät ovat suuria vuodessa.





Kuvio 8. Lämmön ja sähkön osuus euroina kustannuksista/i-m<sup>3</sup>.

## 7. TULOSTEN TARKASTELU

Asiantuntijuushankkeessa on tarkasteltu olemassa olevia ratkaisuja pilkkeen keinokuivaukseen. Tällä hetkellä Suomessa ei ole kovin paljon pilkeyrittäjiä, jotka käyttävät keinokuivausta pilkkeen kuivaamisessa. Pilkkeen tuotannossa ongelma on siinä, että ylivuoteisia polttopuita on markkinoilla runsaasti ja ne pitävät pilkkeen hinnan alhaisena. Tällöin kilpailuvalteiksi keinokuivauksen käyttäjällä jää pilkkeen moitteeton laatu ja reagointikyky pilkkeen kysynnän vaihteluihin. Kesäaikaan kysynnän vaihteluihin pystytään vastaamaan kylmäilmakuivaus ratkaisuiden avulla, mutta talvella vaihtoehtoina ovat joko konttikuivuri tai sahatavarakuivaamon käyttö. Laadultaan hyvään polttopuuhun varmasti pystytään pilkekuivurin avulla, jos sen mitoitus ja rakenne saadaan ihanteelliseksi. Kuivauskustannuksissa tulisi pyrkiä alle 2 euroon, silloin kuivuri on tehokkaasti mitoitettu. Suomen kesä on kuitenkin riski pilkeyrittäjälle, jos hän käyttää kylmäilmakuivausta. Tällöin yrittäjä, joka on investoinut suuriin varastoihin hyötyy selkeästi.

Olemassa olevien tulosten valossa pilkekuivuri on kilpailukykyinen vaihtoehto, jos valmiita, suuria varastoja ei ole. Pilkkeen kuivausaika on parhaimmillaan noin 20 vuorokautta kuivurissa, kun käytetään Työtehoseuran kehittämää siirrettävää pilkekuivuria. Tämä kuivurimalli on edullinen ratkaisu pilkkeen kuivaukseen. Edullisin ratkaisu on kuitenkin Harri Salowin suunnittelema kevytrakenteinen kenttäkuivuri. Edullisista materiaaleista tehty kuivuri kuivattaa pilkkeen reilussa kuukaudessa kuivaksi ja toimii tarvittaessa varastona. Tarkkaa kuivausaikaa ei voi määrittää etukäteen vaan se riippuu säästä ja pilkkeiden alkukosteudesta. Turhaa puhaltamista tulee kuitenkin välttää.

Näiden tulosten valossa suuret kiinteät kuivurit eivät ole paras ratkaisu, koska niistä ei ole olemassa selkeää tutkimustietoa, jota voitaisiin hyödyntää. Yrittäjän ei ole järkevää sijoittaa kymmeniä tuhansia euroja ratkaisuun, jonka toimivuudesta ei voida olla varmoja. Monikäyttökuivurin käyttöä puoltaa se, jos se on jo ennestään ja sille on muutakin tarvetta. Kuivureista on varmasti tulossa lisää tutkimustietoa Työtehoseuralta.

Konttikuivuri otettiin vertailuun, koska lämpimän ilman käyttö kuivauksessa haluttiin selvittää. Konttikuivuri voi toimia ympäri vuoden eikä ilman kosteus ole sille ongelma. Konttikuivurilla saadaan kuivauserä,  $54 \text{ i-m}^3$  pilkettä kuivaksi noin viikossa. Konttikuivuria käytettäessä ei pidetä puhallustaukoja, sillä se lisäisi kustannuksia ja puhallusaikaa. Lämmitysenergia konttiin voisi olla hyvä tuottaa esimerkiksi pilketuotannosta jäävällä roskapuulla, jolloin lämmityskustannukset alentuisivat.

Sahatavarakuivaamoja käyttävät pilkeyrittäjät, joiden vuosittaiset myyntimäärät ovat suuria. Keski-Suomessa ratkaisua ovat käyttäneet karstulalainen Suomenselän Puupilke Oy ja jyvaskyläläinen Vivoset Oy. Kuivaus on kustannuksiltaan kallista, mutta laadultaan siinä saadaan kaikkein parasta pilkettä, koska kuivaus on hyvin kontrolloitua. Kuvassa 9 pilkehäkit on pinottu päällekkäin sahatarakuivaamon kamariin. Häkien asettelu kamariin tapahtuu trukin avulla. Pilkkeen kuivausta sahatarakuivaamossa voidaan harkita silloin, jos pilketuottajan lähellä sijaitsee sahatarakuivaamo. Jos sahatarakuivaamossa kaikki kamarit eivät ole käytössä, voidaan pilkkeen kuivauksella tällöin täydentää käyttöastetta. Sahatarankuivaus on kuitenkin ensisijainen tehtävä.



Kuva 9. Pilkehäkit sahatarakuivaamon kamarissa.

## LÄHTEET

Järvenpää, M., Kivinen, K. 1993 Kylmäilmakuivausopas. Työtehoseura, Pellervolehti.

Kouki, Jyrki. 2001. Pilkekuivurilla hyvälaatuista polttopuuta. Teho-lehti 4/2001.

Perttola, S. 1994. Esitutkimus pilkkeiden tuotannosta ja jakelusta. Työtehoseuran monisteita 33.

Pikkujämsä, J. 2001. Polttopuun kuivausopas. Opinnäytetyö. Seinäjoen ammattikorkeakoulu, maatalousalan yksikkö.

Pirinen, H. 1997. Pilkeopas omakotitaloille. Työtehoseuran julkaisuja 357.

Rinne, S. 2001. Puupolttoaineiden kuivausmenetelmien kartoitus. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, energiatekniikan osasto.

Saranpää, P. ja Tuimala, A. 1997. Kosteus Puussa. Työtehoseuran metsätiedote 577.

Virtanen, R., Ritala, P., Lind, M. 1984. Nalikoiden tuotanto ja jakelu taajamissa. Tutkimusraportti nro 38. Kauppa- ja teollisuusministeriö, energiaosasto.

## LIITTEET

### Liite 1. Siirrettävä kuivuri

#### Siirrettävä pilkekuivuri

##### KUIVAUS TIEDOT

Kuivausaika vuodessa	kk/a	5
Kuivurin kapasiteetti	i-m3/erä	70
Kuivauserät	eriä/a	7
Yhden erän kuivausaika	vrk/erä	20
Täyttö + purkukustannukset	€/i-m3	0,5
Sähkönkulutus	kWh/i-m3	9
Sähkön hinta	€/kWh	0,066
Kuivauskapasiteetti	i-m3/a	490
Poistoaika	a	10
Korko	%	6 %

##### Pilkekuivurin pääomakustannukset

Investoinnit (ilman ALV)		
kuivurirakennus		2 000,00 €
puhallin		700,00 €
		<b>2 700,00 €</b>
korko (6%)	€/a	81,00 €
poisto	€/a	270,00 €
vakuutus ja kunnossapito (1,5%)	€/a	40,50 €
<b>Peruskustannukset</b>	€/a	<b>391,50 €</b>

##### Käyttökustannukset

sähkö	€/a	295,68 €
täyttö ja purku	€/a	245,00 €
<b>Käyttökustannukset</b>		<b>540,68 €</b>

<b>Pääoma- ja käyttökustannukset yhteensä</b>	€/a	<b>932,18 €</b>
<b>Kustannukset</b>	€/i-m3	<b>1,90 €</b>
<b>Sähkön osuus</b>	€/i-m3	<b>0,60 €</b>

## Liite 2. Kiinteä monikäyttökuivuri

**Kiinteä monikäyttökuivuri****KUIVAUS TIEDOT**

Kuivausaika vuodessa	kk/a	5
Kuivurin kapasiteetti	i-m3/erä	500
Kuivauserät	eriä/a	5
Yhden erän kuivausaika	vrk/erä	30
Täyttö + purkukustannukset	€/i-m3	0,5
Sähkönkulutus	kWh/i-m3	8,8
Sähkön hinta	€/kWh	0,066
Kuivauskapasiteetti	i-m3/a	2500
Poisto aika	a	20
Korko	%	6 %

**Pilkekuivurin pääomakustannukset**

Investoinnit (ilman ALV)		
kuivurirakennus		15 000,00 €
puhaltimet 11 kW (2 kpl)		2 000,00 €
		<b>17 000,00 €</b>

korko (6%)	€/a	510,00 €
poisto	€/a	850,00 €
vakuutus ja kunnossapito (1,5%)	€/a	255,00 €
<b>Peruskustannukset</b>	€/a	<b>1 615,00 €</b>

**Käyttökustannukset**

sähkö	€/a	1 452,00 €
täyttö ja purku	€/a	1 250,00 €
<b>Käyttökustannukset</b>		<b>2 702,00 €</b>

<b>Pääoma- ja käyttökustannukset yhteensä</b>	€/a	<b>4 317,00 €</b>
<b>Kustannukset</b>	€/i-m3	<b>1,73 €</b>
<b>Sähkön osuus</b>	€/i-m3	<b>0,58 €</b>

## Liite 3. Kevytrakenteinen kenttäkuivuri

**Kevytrakenteinen kenttäkuivuri****KUIVAUS TIEDOT**

Kuivausaika vuodessa	kk/a	5
Kuivurin kapasiteetti	i-m3/erä	100
Kuivauserät	eriä/a	5
Yhden erän kuivausaika	vrk/erä	30
Täyttö + purkukustannukset	€/i-m3	0,5
Sähkönkulutus	kWh/i-m3	8
Sähkön hinta	€/kWh	0,066
Kuivauskapasiteetti	i-m3/a	500
Poisto aika	a	10
Korko	%	6 %

**Pilkekuivurin pääomakustannukset**

Investoinnit (ilman ALV)		
kuivurirakennus		1 000,00 €
puhallin 4 kW		700,00 €
		<b>1 700,00 €</b>

korko (6%)	€/a	51,00 €
poisto	€/a	170,00 €
vakuutus ja kunnossapito (1,5%)	€/a	25,50 €
<b>Peruskustannukset</b>	€/a	<b>246,50 €</b>

**Käyttökustannukset**

sähkö	€/a	264,00 €
täyttö ja purku	€/a	250,00 €
<b>Käyttökustannukset</b>		<b>514,00 €</b>

<b>Pääoma- ja käyttökustannukset yhteensä</b>	€/a	<b>760,50 €</b>
<b>Kustannukset</b>	€/i-m3	<b>1,52 €</b>
<b>Sähkön osuus</b>	€/i-m3	<b>0,53 €</b>

## Liite 4. Lämminilma konttikuivuri

**Lämminilma konttikuivuri****KUIVAUS TIEDOT**

Kuivausaika vuodessa	kk/a	10
Kuivurin kapasiteetti	i-m3/erä	54
Kuivauserät	eriä/a	40
Yhden erän kuivausaika	vrk/erä	6
Täyttö + purkukustannukset	€/i-m3	0,5
Lämmönkulutus	kWh/i-m3	100
Sähkönkulutus	kWh/i-m3	10,7
Sähkön hinta	€/i-m3	0,066
Lämmön hinta	€/MWh	8
Kuivauskapasiteetti	i-m3/a	2160
Poisto aika	a	20
Korko	%	6 %

**Pilkekuivurin pääomakustannukset**

Investoinnit (ilman ALV)		
kuivurirakennus		3 000,00 €
Lämmitysjärjestelmä		3 000,00 €
puhallin 4 kW		2 000,00 €
		<b>8 000,00 €</b>
korko (6%)	€/a	240,00 €
poisto	€/a	400,00 €
vakuutus ja kunnossapito (1,5%)	€/a	120,00 €
<b>Peruskustannukset</b>	<b>€/a</b>	<b>760,00 €</b>
<b>Käyttökustannukset</b>		
Lämpö	€/a	1 728,00 €
sähkö	€/a	1 520,64 €
täyttö ja purku	€/a	1 080,00 €
<b>Käyttökustannukset</b>		<b>4 328,64 €</b>
<b>Pääoma- ja käyttökustannukset yhteensä</b>	<b>€/a</b>	<b>5 088,64 €</b>
<b>Kustannukset</b>	<b>€/i-m3</b>	<b>2,36 €</b>
<b>Sähkön osuus</b>	<b>€/i-m3</b>	<b>0,70 €</b>
<b>Lämmön osuus</b>	<b>€/i-m3</b>	<b>0,80 €</b>



## Liite 5. Polttopuukatos

**Polttopuu katos****KUIVAUS**

Kuivausaika vuodessa	kk/a	6
Katoksen kapasiteetti	i-m3/erä	500
Yhden erän kuivausaika	kk/erä	6
Täyttö + purkukustannukset	€/i-m3	0,5
Sähkönkulutus	kWh/i-m3	
Sähkön hinta	€/kWh	
Kuivauskapasiteetti	i-m3/a	500
Poisto aika	a	20
Korko	%	6 %

**Katoksen pääomakustannukset**

Investoinnit (ilman ALV)		
katos (lev. 3,5 m, kork. 3 m, pit. 50 m)	€	12 000,00 €
korko (6%)	€/a	360,00 €
poisto	€/a	600,00 €
vakuutus ja kunnossapito (1%)	€/a	120,00 €
<b>Peruskustannukset</b>	€/a	1 080,00 €

**Käyttökustannukset**

täyttö ja purku	€/a	250,00 €
<b>Käyttökustannukset</b>		250,00 €

<b>Pääoma- ja käyttökustannukset yhteensä</b>	€/a	1 330,00 €
<b>Kustannukset</b>	€/i-m3	2,66 €